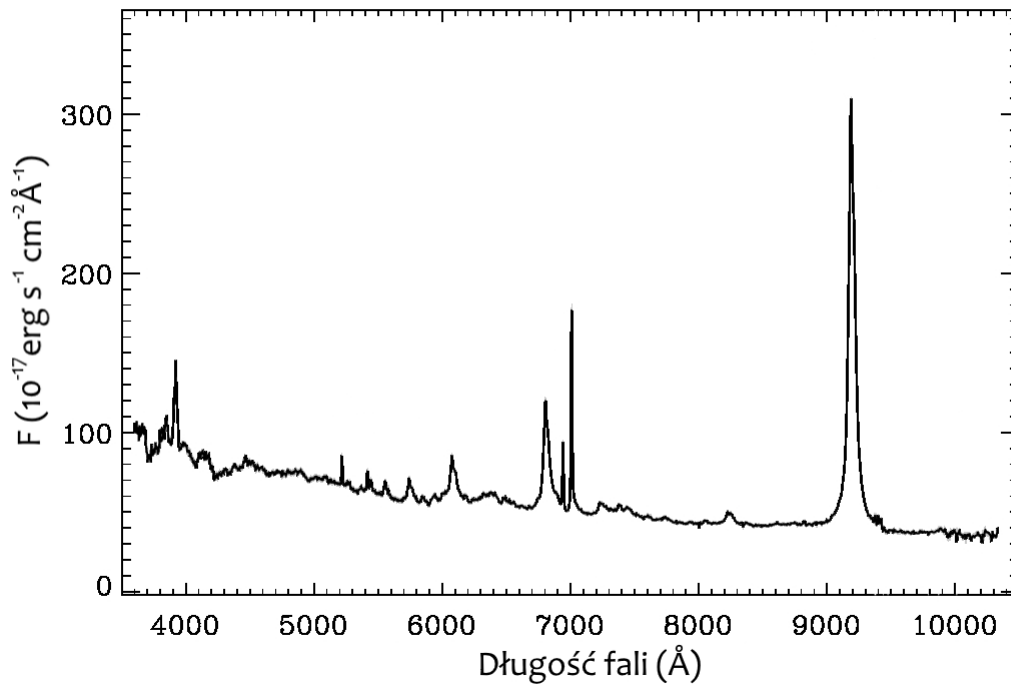


Rozwiązania serii II (praktycznej)

4. Kwazary to obiekty emitujące ogromne ilości promieniowania elektromagnetycznego. Na poniższym wykresie przedstawiono widmo takiego obiektu, wykonane w ramach przeglądu nieba Sloan Digital Sky Survey (SDSS) – wybrany kwazar oznaczono jako SDSS J005205.57+003538.1.



Rysunek 1: Widmo kwazara SDSS J005205.57+003538.1. Źródło: SDSS.

Oś X przedstawia długości odbieranych fal światła w angstrmach ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m} = 10^{-1} \text{ nm}$), zaś oś Y wartość proporcjonalną do natężenia promieniowania kwazara odbieranego przez nas w konkretnej długości fali.

Charakterystyczne wąskie przedziały długości, w których obiekt promieniuje zdecydowanie bardziej intensywnie w porównaniu do tła (typowych wartości odnotowywanych w okolicy), nazywa się liniami emisyjnymi – na ich podstawie można m.in. ustalać skład chemiczny wybranego obiektu.

Zgodnie z prawem Hubble’a, im dalej znajduje się obiekt, tym szybciej się od nas oddala w wyniku rozszerzania się wszechświata. Prędkość ta powoduje, że, z naszej perspektywy, światło emitowane przez obiekt zmienia długość fali (analogicznie do efektu Dopplera dla fal dźwiękowych). Powoduje to wydłużenie długości fal emitowanych przez dany obiekt przez czynnik z zależny od szybkości oddalania się obiektu v_r od obserwatora. Dla prędkości v_r istotnie mniejszych od prędkości światła w próżni c i obiektu w odległości d od Ziemi:

$$z = \frac{v_r}{c}, \quad v_r = Hd$$

Zarazem przesunięcie ku czerwieni z definiujemy w zależności od długości fali obserwowanej (rejestrowanej) przez przyrządy pomiarowe λ_o oraz długości fali emitowanej oryginalnie przez obiekt (układ laboratoryjny) λ_e , zgodnie ze wzorem:

$$z = \frac{\lambda_o - \lambda_e}{\lambda_e}$$

Korzystając z wykresu dopasuj co najmniej 3 linie widmowe widoczne na widmie SDSS J005205.57+003538.1, oblicz ich przesunięcie ku czerwieni oraz oszacuj odległość od Ziemi do kwazara.

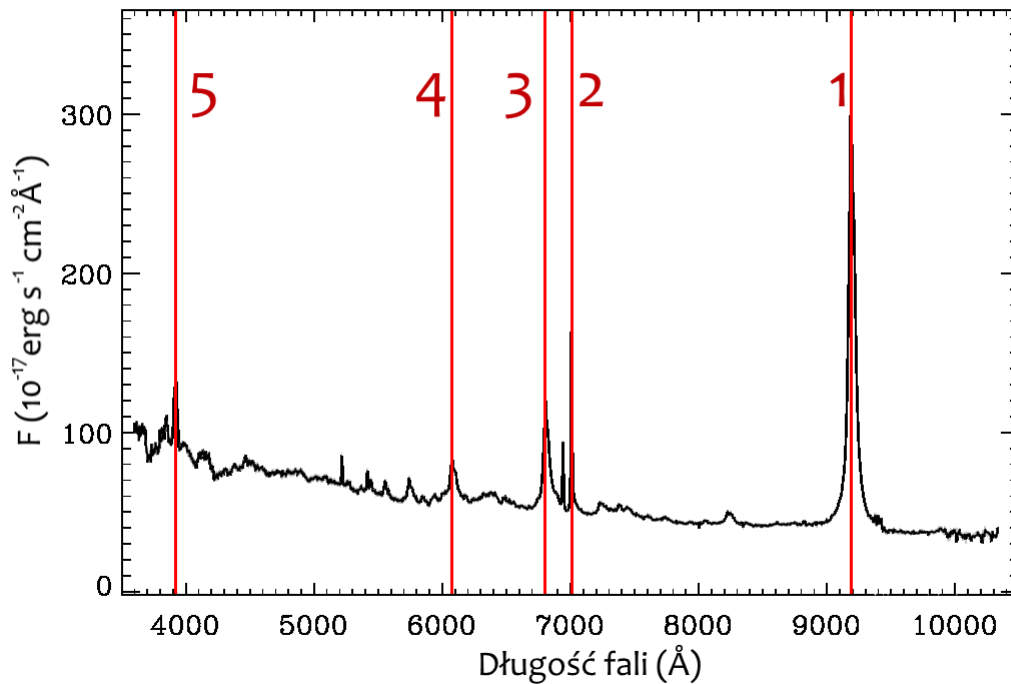
Do najczęściej obserwowanych widm emisyjnych kwazarów należą (dane ustalone w układzie laboratoryjnym): $H\alpha$ (6565 Å), O III (5008 Å), O III (4960 Å), $H\beta$ (4863 Å), $H\gamma$ (4342 Å), $H\delta$ (4103 Å), Mg II (2799 Å). Linie emisyjne oznacza się nazwą pierwiastka, który je emituje, liczbą rzymską (w przypadku wodoru grecką literą) oznaczającą stopień jonizacji (stopień wzbudzenia elektronów elektronów) oraz laboratoryjną długością fali.

Uwaga. Nie wszystkie wymienione linie widmowe muszą znajdować się w widmie. Ich występowanie zależy m.in. od składu chemicznego kwazara.

autor: Michał Jagodziński

Rozwiązanie

Na początku rozwiązania ustalimy położenia przykładowych najsilniejszych linii emisyjnych na wykresie, wraz z odczytaniem długości fal im odpowiadających – jest to przedstawione na poniższym rysunku.



Rysunek 2: Widmo kwazara SDSS J005205.57+003538.1 z dopasowaniem linii widmowych. Źródło: SDSS.

Odpowiednie linie emisyjne (których nazw jeszcze nie znamy) ponumerowaliśmy liczbami od 1 do 5 (zgodnie z rysunkiem). Z wykresu (np. za pomocą linijki) odczytujemy długości fali, jakie obserwujemy z pomocą przyrządów pomiarowych (spektroskopu). Odpowiednie indeksy oznaczają odpowiedni numer zaznaczonej na rysunku linii. Otrzymujemy: $\lambda_1 = 9200$ Å, $\lambda_2 = 7000$ Å, $\lambda_3 = 6800$ Å, $\lambda_4 = 6080$ Å, $\lambda_5 = 3920$ Å.

Korzystając z drugiego podanego w treści zadania wzoru na przesunięcie ku czerwieni (*redshift*) z , możemy zapisać:

$$z = \frac{\lambda_o - \lambda_e}{\lambda_e} = \frac{\lambda_o}{\lambda_e} - 1$$

Stąd możemy stwierdzić, że:

$$1 + z = \frac{\lambda_o}{\lambda_e} \quad (1)$$

Przy oznaczeniach zgodnych z oznaczeniami podanymi w treści zadania – tj. λ_e – długość fali emitowana przez obiekt (układ laboratoryjny; odpowiadać to będzie długościom fali podanymi na końcu treści zadania) oraz λ_o – długość fali obserwowanej (rejestrwanej) przez przyrządy pomiarowe (są to długości odczytywane wprost z wykresu).

Dopasowanie odpowiednich linii widocznych na wykresie do odpowiednich linii emisyjnych podanych w treści zadania (związanych z pierwiastkami wchodzącymi w skład obiektu) wykonamy tzw. „metodą prób i błędów”. Na początku wybierzemy pewną linię na wykresie, do której będziemy dobierać kolejne często obserwowane linie emisyjne podane w układzie laboratoryjnym (stacjonarnym); stąd z pomocą wzoru (1) stwierdzimy, ile wynosiłoby przesunięcie ku czerwieni wszystkich linii widmowych z , gdyby dopasowanie to było poprawne – będzie to nasza tymczasowa hipoteza. Następnie z pomocą prostego przekształcenia wzoru (1) do postaci $\lambda_o = (1 + z)\lambda_e$ zweryfikujemy naszą hipotezę. Łącząc teraz wiedzę o najczęściej obserwowanych widmach emisyjnych kwazarów z hipotezą na temat wartości z , możemy ustalić, na jakich długościach fali wykrylibyśmy odpowiednie linie emisyjne (podane w treści zadania – podstawiamy je jako kolejne wartości λ_e) na wykresie. Jeśli przynajmniej kilka z otrzymanych wyników, w których przewidujemy zaobserwować linie emisyjne kwazara będzie zgodnych z tymi bezpośrednio odczytanymi z wykresu (tj. $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$), będziemy mogli stwierdzić, że hipoteza może zgadzać się z rzeczywistością – ustalimy więc oczekiwane w zadaniu przesunięcie ku czerwieni linii widmowych, a także otrzymamy ich dopasowanie.

W tym przypadku zastosujemy różne hipotezy dotyczące dopasowania linii oznaczonej numerem 3 na wykresie. Wyniki przedstawione są w poniższej tabeli. Pierwsze dwa wiersze zawierają przydatne do obliczeń dane podane w treści (długości fal linii emisyjnych emitowanych w układzie laboratoryjnym) oraz zmierzoną rejestrowaną długość fali linii emisyjnej oznaczonej na wykresie numerem 3. Wiersze począwszy od czwartego odpowiadają kolejnym hipotezom – dopasowaniom wartości linii λ_3 , kolejnej możliwej linii emitowanej przez kwazar (układ laboratoryjny). Na tej podstawie obliczamy z' – hipotetyczne przesunięcie ku czerwieni, gdyby dopasowanie było poprawne, a stąd kontynuujemy, obliczając dla kolejnych wzorcowych linii widmowych, gdzie ich wystąpienia oczekiwalibyśmy w tym przypadku na wykresie – λ'_o (odpowiednie kolumny wskazują na odpowiednie linie, wskazane w pierwszym wierszu). Przykładowo, jeśli zakładamy, że obserwowana na wykresie linia 3 odpowiada linii emisyjnej $H\gamma$, wtedy $\lambda'_{e_3} = 4342 \text{ \AA}$. Przy takim założeniu otrzymujemy:

$$z' = \frac{\lambda_o}{\lambda_e} - 1 = \frac{\lambda_3}{\lambda'_{e_3}} - 1 = \frac{6800 \text{ \AA}}{4342 \text{ \AA}} - 1 = 0.566$$

Stąd możemy np. obliczyć, gdzie na wykresie pojawiłaby się linia Mg II, gdyby kwazar takową emitował:

$$\lambda'_{o_{Mg}} = (1 + z')\lambda_{e_{Mg}} = 1.566 \cdot 2799 \text{ \AA} = 4380 \text{ \AA}$$

Na wykresie w bliskim otoczeniu tej długości nie obserwujemy jednak żadnej linii widmowej.

Nietrudno jednak zauważyć, że w przypadku dopasowania linii $H\beta$ do linii nr 3 na wykresie (7. wiersz tabeli), wiele wyników odczytanych na początku rozwiązania z wykresu jest bardzo zgodnych z wynikami przewidywanymi przez naszą hipotezę ($z' = 0.398$). Co więcej w okolicy dwóch pozostałych wartości obserwowanych długości fali linii emisyjnych przewidywanych przez naszą hipotezę na wykresie także znajdujemy linie widmowe, słabsze, pominięte przez nas w początkowej części rozwiązania (ponieważ wynik należy jedynie oszacować, należy uwzględnić taką liczbę punktów pomiarowych, która pozwala uzyskać wynik o satysfakcjonującej wielkości niepewności oszacowania). Pozwala to z dużą dozą prawdopodobieństwa stwierdzić, że przesunięcie ku czerwieni kwazara wynosi $z \approx 0.40$.

Aby policzyć odległość do tej aktywnej galaktyki z centralną supermasywną czarną dziurą (gdyż kwazary są właśnie takimi obiektami), skorzystamy z dwóch pierwszych wzorów podanych w treści zadania. Podstawiając prawo Hubble’a do pierwszego wzoru na przesunięcie ku czerwieni, dostajemy:

$$z = \frac{H \cdot d}{c}$$

λ_3	H α	O III	O III	H β	H γ	H δ	Mg II	
6800 Å	6565 Å	5008 Å	4960 Å	4863 Å	4342 Å	4103 Å	2799 Å	
λ'_{e_3} [Å]	z'	λ'_o [Å]						
6565	0.036	6800	5190	5140	5040	4500	4250	2900
5008	0.358	8910	6800	6730	6600	5900	5570	3800
4960	0.371	9000	6870	6800	6670	5950	5630	3840
4863	0.398	9180	7000	6940	6800	6070	5740	3910
4342	0.566	10280	7840	7770	7620	6800	6430	4380
4103	0.657	10880	8300	8220	8060	7200	6800	4640
2799	1.429	15950	12170	12050	11810	10550	9970	6800

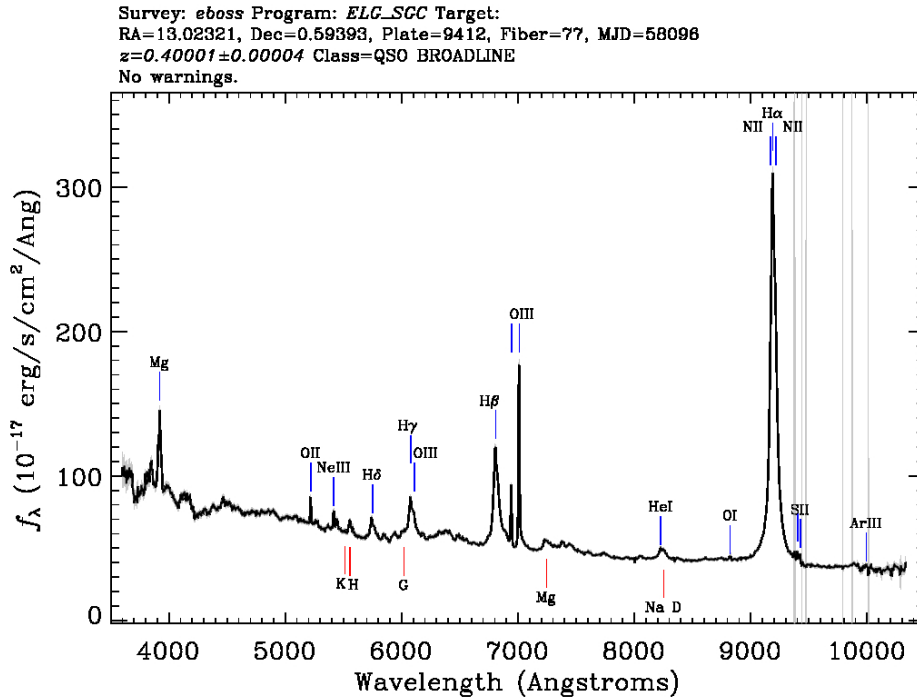
Tablica 1: Przewidywane obserwowane położenia odpowiednich linii widmowych w zależności od hipotez

Gdzie H – stała Hubble’a (podana w stałych), d – szukana odległość do kwazara oraz c – prędkość światła w próżni. Stąd z pomocą prostych przekształceń otrzymujemy:

$$d = \frac{z \cdot c}{H} = \frac{0.40 \cdot 3 \times 10^5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}}{70 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}} \approx 1700 \text{ Mpc}$$

Zatem odległość od Ziemi do kwazara wynosi ok. 1700 megaparseków, co kończy rozwiązanie zadania.

Uwaga. Poniżej znajduje się pełne dopasowanie wszystkich ustalonych linii widmowych wykonane przez SDSS. Do rozwiązania zadania należy poprawnie oznaczyć 3 spośród linii wymienionych w treści.



Rysunek 3: Widmo kwazara SDSS J005205.57+003538.1 z dopasowaniem linii widmowych. Źródło: SDSS.

autor rozwiązania: Michał Jagodziński

5. Zadanie pod sztucznym niebem planetarium

Znajdujesz się pod sztucznym niebem planetarium. Zostaną na nim wyświetlone dwa scenariusze. Do dyspozycji masz czerwoną latarkę, kartę odpowiedzi, podkładkę oraz przybory do pisania. Do rozwiązania drugiego scenariusza dodatkowo otrzymasz obrotową mapę nieba. Oba scenariusze odbywają się w XXI wieku.

Podając nazwy gwiazdozbiorów możesz używać nazw polskich, łacińskich lub trzyliterowych skrótów IAU (ang. *International Astronomical Union*, Międzynarodowa Unia Astronomiczna). W przypadku zadań, w których nie prosimy o opisanie metody wystarczy podać wyłącznie odpowiedź.

Scenariusz 1 Znajdujesz się w Chorzowie. Dwukrotnie wyświetlony zostanie ten sam przelot Międzynarodowej Stacji Kosmicznej w czasie rzeczywistym, trwający około 5 minut.

- Oszacuj maksymalną jasność obserwowaną ISS w trakcie przelotu.
- Zapisz 5 gwiazdozbiorów, przez które przelatuje widoczna ISS.
- Przez który gwiazdozbiór przelatuje ISS, gdy przestaje być widoczna?

Scenariusz 2 Znajdujesz się na północnej półkuli. W ciągu 12 minut zobaczysz niebo z trzech przyspieszonych dób. Możesz używać mapy nieba, którą ci dostarczono. Na podstawie obserwacji:

- Określ szerokość geograficzną miejsca, w którym się znajdujesz. Opisz użytą metodę lub przedstaw rachunki.
- Określ, w jakim gwiazdozbiorze znajduje się Księżyc.
- Określ (z dokładnością do 15 dni) datę dzienną (dzień i miesiąc, bez roku). Opisz użytą metodę lub przedstaw rachunki.

Wskazówka: wykorzystaj znajomość fazy Księżyca i odpowiedź z podpunktu b)

- Oszacuj elongację planety zewnętrznej widocznej w gwiazdozbiorze Byka (Tau).

Odtwarzanie scenariuszy w domu W celu przygotowania się do finału OAJ przedstawiamy sposób na odtworzenie podanych scenariuszy w domu. Proponujemy użycie bezpłatnej, open source-owej aplikacji *Stellarium* (<https://stellarium.org/>). W celu imitacji warunków panujących w planetarium:

- na dolnym panelu: wyłączamy punkty kardynalne, podpisy planet, gwiazdozbiorów, linie i granice gwiazdozbiorów
- w lewym panelu, w oknie *Sky and viewing options window* (domyślnie przycisk F4) wyłączamy podpisy gwiazd i potencjalnie zmniejszamy jasność Drogi Mlecznej
- znacznie oddalamy widok, żeby widzieć większość lub całe niebo.
- datę wybieramy w oknie *Date/time window* (F5), a lokalizację w *Location window* (F6), dostępnych w lewym panelu.
- Informacje dodatkowe, niepotrzebne do realizacji powyższych scenariuszy: W oknie *Sky and viewing options window* możemy dodatkowo zmienić projekcję, a w zakładce *Markings* możemy wyświetlić istotne punkty/koła wielkie/siatki współrzędnych na niebie, takie jak bieguny niebieskie, południk lokalny, siatka równikowa/horyzontalna czy ekliptyka (nie będą one jednak wyświetlone przy rozwiązywaniu zadania planetarnego). Z kolei w oknie *Configuration window* (F2) możemy pobrać dodatkowe katalogi gwiazd, dodając ciemniejsze gwiazdy do symulacji.

W celu odtworzenia pierwszego scenariusza proponujemy wybranie daty 18.01.2025 i godziny 17:56 w Chorzowie. Po chwili powinniśmy zobaczyć wejście ISS ponad horyzont z kierunku południowego zachodu. ISS przestaje być widoczna około 18:02:30. Inne przeloty ISS, również te obserwowane z innych miejsc na świecie, też dobrymi przykładami - ich daty można sprawdzić na stronie <https://www.heavens-above.com/PassSummary.aspx>.

Zasadniczo scenariusz drugi można odtworzyć wybierając dowolne miejsce na Ziemi i prawie dowolną datę. W wersji przez nas zaplanowanej proponujemy wybór daty tak, by pełnia Księżycy wypadła

w pierwszej dobie scenariusza (tak jest najprościej). Gwiazdozbiór Byka w podpunkcie d) nie jest szczególny, a wyznaczenie elongacji w tym scenariuszu jest możliwe dla dowolnej planety, która w nocy znajduje się nad horyzontem. Polecamy przeciwiczenie tego zadania na różnych szerokościach geograficznych i przy różnych datach.

autor: Krzysztof Król

Rozwiązanie

Scenariusz 1

a) Maksymalną jasność ISS szacujemy porównując wizualnie jasność stacji w trakcie przelotu do jasnych gwiazd na niebie, których jasność znamy. W tym przypadku nie wymagalibyśmy wysokiej precyzji – błąd rzędu 1 magnitudo byłby akceptowalny.

b) Odpowiedź zależy od konkretnego przelotu.

c) j.w.

Scenariusz 2

a) Szacowanie wysokości nad horyzontem Polaris „na oko” nie działa dobrze w planetarium, bo ostrzeżenie odległości jest istotnie zniekształcone w zależności od miejsca, w którym siedzimy. Dobrym sposobem na rozwiązanie tego zadania jest zaobserwowanie relatywnie jasnej gwiazdy, która dołuje bardzo blisko horyzontu. Jak wiemy, kąt między równikiem niebieskim a biegunem niebieskim to, z definicji, kąt prosty. Ponadto północny biegun niebieski dla obserwatora na półkuli północnej znajduje się na wysokości φ – równej szerokości geograficznej miejsca obserwacji. W takim razie gwiazda, która dołuje tuż przy horyzoncie znajduje się w odległości (kątownej) φ od bieguna niebieskiego. Z mapy nieba możemy dodatkowo odczytać jej deklinację δ . Deklinacja jest mierzona od równika niebieskiego, dlatego $\delta + \varphi = 90^\circ$. Stąd w końcu $\varphi = 90^\circ - \delta$. Spokojnie, nie trzeba tego wszystkiego wymyślić będąc w planetarium – zadanie poznaje się wcześniej (razem z zadaniem z analizy danych) i można przemyśleć strategię przed wejściem do planetarium.

b) Zależy od konkretnej daty, nie powinno stworzyć problemu. Warto wiedzieć, że Księżyc zawsze znajduje się maksymalnie $\approx 5^\circ$ od ekliptyki – jest więc spora szansa, że będzie się znajdował w którymś gwiazdozbiórze ekliptycznym.

c) Jeśli Księżyc jest w pełni, to wiemy, że Słońce znajduje się po przeciwnej stronie nieba do niego. Na mapie nieba znajdujemy gwiazdozbiór ekliptyczny po przeciwnej stronie nieba od Księżyca. Na podstawie tego możemy określić datę (szczegóły zależą od konkretnej mapy nieba, ale wiele z nich zawiera oznaczone położenia Słońca na początku poszczególnych miesięcy).

Uwaga: pamiętajmy, że gwiazdozbiory ekliptyczne i faktyczne położenie Słońca na niebie w ciągu roku nie pokrywają się z tzw. „znakami zodiaku”. W szczególności każdy gwiazdozbiór nie zajmuje takiej samej części ekliptyki, a ponadto gwiazdozbiórów ekliptycznych jest 13, nie 12 (dochodzi często zapominany gwiazdozbiór Wężownika).

d) Z poprzedniego podpunktu znamy położenie Słońca na niebie. Elongacja to odległość (kątowna) między obiektem i Słońcem, także ponownie badamy ten kąt na mapie nieba. Odległość mierzymy wzdłuż ekliptyki (bo to najkrótsza droga między tymi punktami, a więc z definicji odległość).

autor rozwiązania: Krzysztof Król